

УДК 621.78

В. В. Воропаев^{1*}, В. П. Кузнецов²

¹Предприятие «Сенсор», г. Курган

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

**sen_vvv@mail.ru*

Научный руководитель — д-р техн. наук, проф. *В. П. Кузнецов*

ФРИКЦИОННАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА ХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ ВРАЩАЮЩИМСЯ ИНСТРУМЕНТОМ

Определены условия реализации и параметры процесса фрикционной поверхностной закалки хромистых сталей вращающимся инструментом. Установлено распределение температуры по глубине поверхностного слоя в зависимости от величины теплового потока и времен нагрева и охлаждения материала. Приведены зависимости времени выдержки и коэффициента диффузии углерода от температуры нагрева стали 20Х13.

Ключевые слова: фрикционная поверхностная закалка, хромистая сталь, тепловой поток, температура, коэффициент диффузии, скорость охлаждения, время выдержки.

V. V. Voropaev, V. P. Kuznetsov

FRICTION SURFACE HARDENING OF CHROME-PLATED STEELS WITH A ROTATING TOOL

The conditions of implementation and parameters of the process of friction surface hardening of chrome-plated steels with a rotating tool are determined. The temperature distribution over the depth of the surface layer is established depending on the value of the heat flow and the times of heating and cooling of the material. The dependences of the exposure time and the carbon diffusion coefficient on the heating temperature of 20 Cr13 steel are given.

Key words: friction surface hardening, chrome-plated steel, heat flow, temperature, diffusion coefficient, velocity of cooling, time of heating, exposure time.

Фрикционная поверхностная закалка вращающимся инструментом (ФПЗ ВИ), по аналогии с лазерной и плазменной закалкой, заключается в формировании аустенитной структуры при нагреве и ее последующем превращении в мартенсит на этапе охлаждения.

Нагрев материала обеспечивается за счет выделения фрикционного тепла мощностью P_{μ} в контактной зоне вращающегося инструмента. При этом на нагрев упрочняемого материала расходуется только часть выделяемого тепла φ_{μ} , которая меньше P_{μ} на величину потерь в инструмент $\varphi_{и}$. Процесс ФПЗ происходит после предварительного разогрева материала до температуры выше $A_{с3}$ при выстое вращающегося инструмента без подачи ($f = 0$).

Время выстоя вращающегося инструмента должно быть достаточным для установления теплового баланса ($\varphi_{и} = \text{const}$ и $\varphi_{\mu} = \text{const}$) при температуре $T_{н}$ в контактной зоне в пределах $A_{с3} < T_{н} < T_{пл}$. При движении инструмента отношение его диаметра d к величине подачи f определяет время нагрева $t_{н}$, которое характеризует, как долго данная точка материала будет нагреваться в результате воздействия теплового потока φ_{μ} с плотностью q_{μ} . Аустенизация материала в процессе ФПЗ ВИ определяется температурой нагрева $T_{н}$ и диффузией углерода.

Ключевым вопросом реализации технологии ФПЗ ВИ является обеспечение аустенизации за короткий промежуток времени в единицы секунд, что возможно при нагреве материала до температуры, близкой к $T_{пл}$.

Для определения параметров процесса закалки, таких как распределение температуры нагрева $T_{н}$ и охлаждения $T_{охл}$ по глубине поверхностного слоя и во времени, коэффициента диффузии $D_{с}$ и скоростей нагрева $v_{н}$ и охлаждения $v_{охл}$, предложено использовать модель полубесконечной тепловой задачи быстродвижущегося точечного источника [1].

Распределение температуры по глубине поверхностного слоя h за время нагрева $t_{н}$ может быть оценено по формуле:

$$T_{н}(h) = \frac{2q_{\mu}\sqrt{at}}{\lambda} \text{ierfc}\left(\frac{h}{2\sqrt{at}}\right), \quad (1)$$

где $\text{ierfc}(x)$ — стандартная функция кратного интеграла вероятности, λ и a — тепло- и температуропроводность материала, соответственно.

Скорость нагрева определяется по формуле:

$$v_n = \frac{\partial T(h, t)}{\partial t} = \frac{q_m}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{a}{t}} \operatorname{ierfc} \left[\frac{h}{2\sqrt{at}} \right] + \frac{h}{2t} \operatorname{erfc} \left[\frac{h}{2\sqrt{at}} \right] \right). \quad (2)$$

Для расчета скорости охлаждения предлагается выражение для температурного поля после прекращения действия источника теплоты (для моментов времени $t > t_n$). Для этих целей использовалось понятие стока теплоты (источника с отрицательной плотностью потока). Использование стока теплоты, сдвинутого относительно источника теплоты на время нагрева t_n , дает возможность записать формулу для температурного поля:

$$T_{\text{охл}}(h, t) = \frac{q_m}{\lambda} \left(\sqrt{at} \operatorname{ierfc} \left[\frac{h}{2\sqrt{at}} \right] - \sqrt{a(t-t_n)} \operatorname{ierfc} \left[\frac{h}{2\sqrt{a(t-t_n)}} \right] \right). \quad (3)$$

Величина q_m определялась по формуле:

$$q_m = K_{\text{и}} \left(\frac{4}{3} \pi^2 \mu P n R^3 \right), \quad (4)$$

где $K_{\text{и}}$ — коэффициент, учитывающий долю теплового потока q_m в инструменте. Методом конечно-элементного моделирования в пакете ANSYS для инструмента радиусом $R = 9,5$ мм, коэффициента трения $\mu = 0,2$ и частоты вращения $n = 4000$ об/мин при контактном давлении $P = 55 \cdot 10^6$ Н/м² установлено, что величина $K_{\text{и}} \approx 0,2$.

Скорость охлаждения поверхности после прекращения действия источника тепла определяется производной температуры охлаждения по времени:

$$v_c = \frac{\partial T_{\text{охл}}(h, t)}{\partial t}. \quad (5)$$

Коэффициент диффузии D_c для хромистых сталей в зависимости от времени нагрева определялся согласно [2] по формуле:

$$D_c = \exp \left[V_0 + \sum V_j \cdot C_j \right] \exp \left[- (Q_0 + \sum Q_j \cdot C_j) / (RT) \right], \quad (6)$$

где C_j — содержание j -ого элемента в стали, мас. %; коэффициент $V_0 = -12,51 \pm 0,51$ м²/с; $Q_0 = 12560 \pm 2530$ Дж/моль; $V_j = 0,17 \pm 0,05$ м²/с; $Q_j = 2710 \pm 535$ Дж/моль.

Для фрикционной поверхностной закалки стали 20X13 твердосплавным вращающимся инструментом получены расчетные за-

висимости рабочих параметров процесса, которые представлены на рис. 1 и 2.

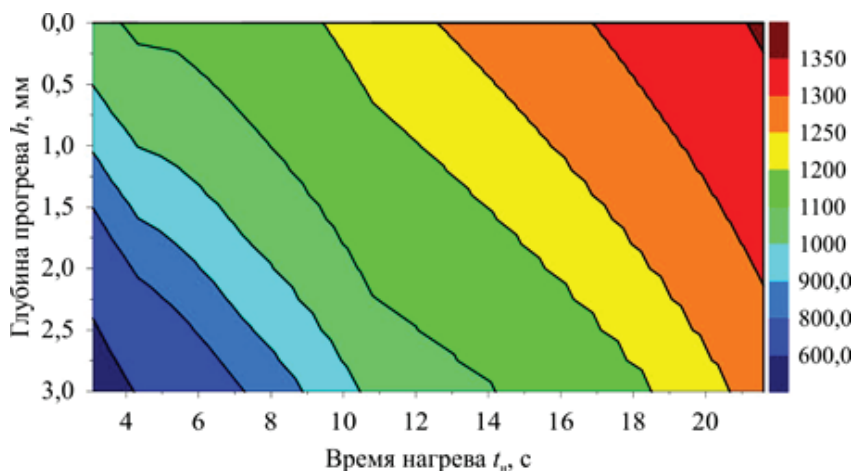


Рис. 1. Распределение температуры по глубине поверхностного слоя в зависимости от времени нагрева материала

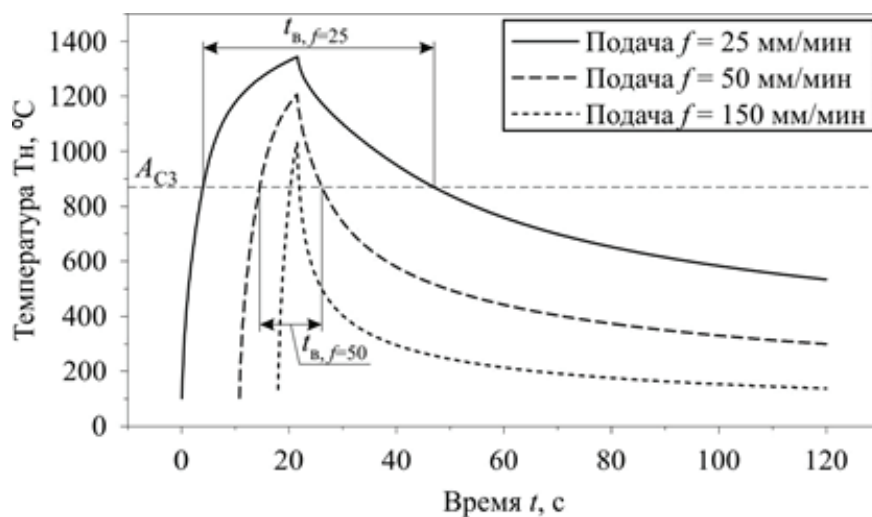


Рис. 2. Расчетные характеристики времени выдержки при $T_n > A_{c3}$ в зависимости от подачи инструмента и температуры нагрева на глубине 0,5 мм

Зависимость коэффициента диффузии углерода от температуры нагрева представлена на рис. 3.

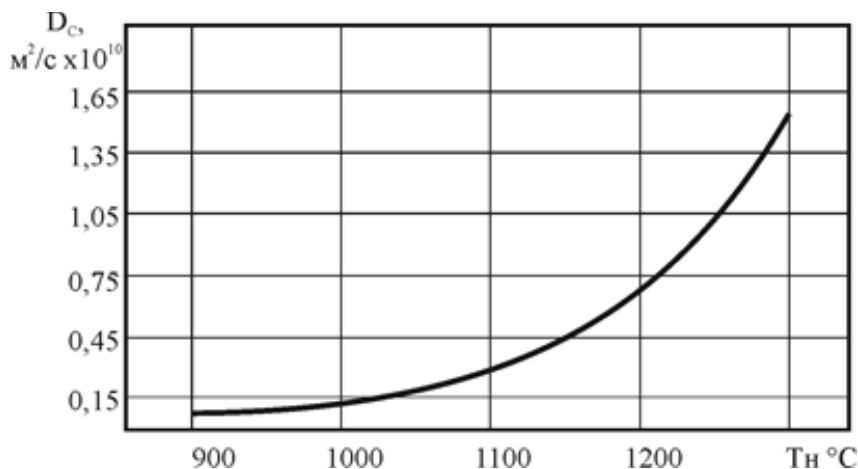


Рис. 3. График зависимости коэффициента диффузии углерода D_c от температуры нагрева T_n

По формуле $\tau_{\text{диф}} = \frac{h^2}{6D_c(T_n)}$ определено, что время диффузии при температуре $T_n = 1300$ °C на глубине 50 мкм составляет примерно 3 с, на глубине 100 мкм — 10 с и на глубине 200 мкм — 47 с.

Литература

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.]. М. : Машиностроение, 1985. 496 с.
2. Лобанов М.Л., Зорина М.А. Методы определения коэффициентов диффузии : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 100 с.